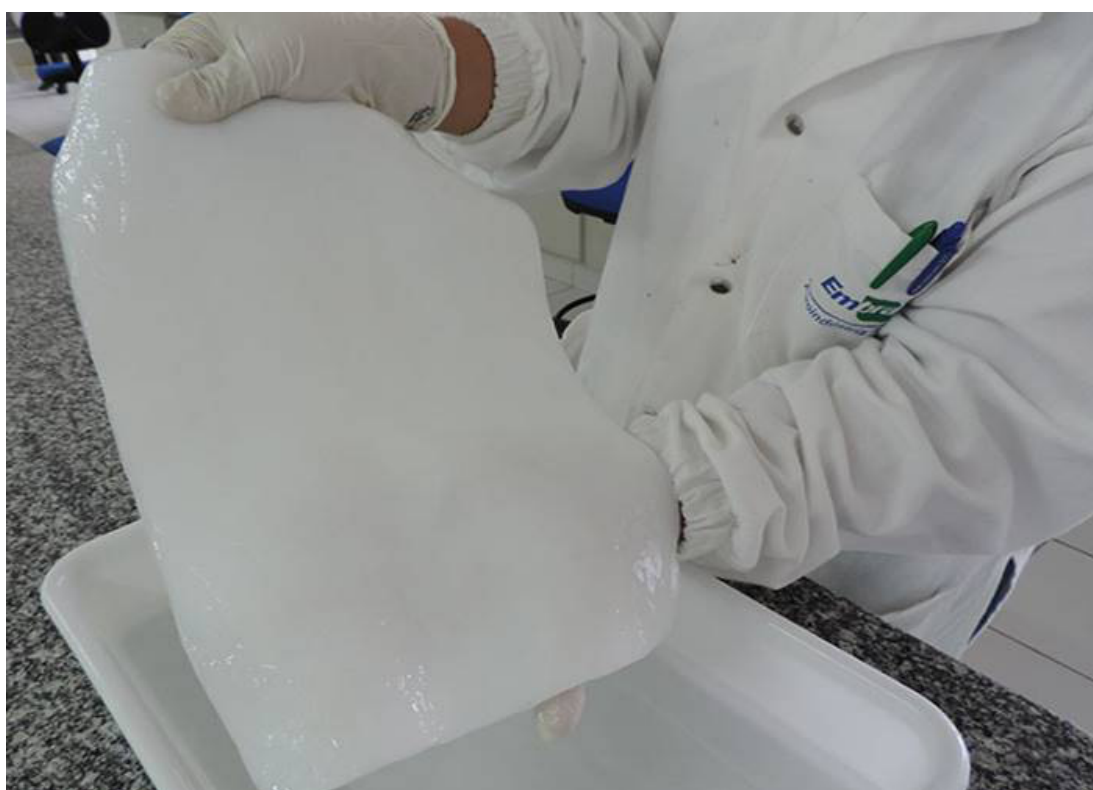




## Viabilidade Técnica e Econômica de Processo Simulado para Produção de Celulose Bacteriana em Melaço de Soja



***Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária  
Embrapa Agroindústria Tropical  
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento***

## **DOCUMENTOS 192**

# **Viabilidade Técnica e Econômica de Processo Simulado para Produção de Celulose Bacteriana em Melaço de Soja**

Raimundo Marcelino da Silva Neto  
Carlos Wagner Castelar Pinheiro Maia  
Morsyleide de Freitas Rosa

Unidade responsável pelo conteúdo e edição:

**Embrapa Agroindústria Tropical**  
Rua Dra. Sara Mesquita 2270, Pici  
CEP 60511-110 Fortaleza, CE  
Fone: (85) 3391-7100  
Fax: (85) 3391-7109  
[www.embrapa.br/agroindustria-tropical](http://www.embrapa.br/agroindustria-tropical)  
[www.embrapa.br/fale-conosco](http://www.embrapa.br/fale-conosco)

Comitê Local de Publicações  
da Embrapa Agroindústria Tropical

Presidente  
*Gustavo Adolfo Saavedra Pinto*

Secretária-executiva  
*Celli Rodrigues Muniz*

Secretária-administrativa  
*Eveline de Castro Menezes*

Membros  
*Marlos Alves Bezerra, Ana Cristina  
Portugal Pinto de Carvalho, Deborah  
dos Santos Garruti, Dheyne Silva Melo,  
Ana Iraidy Santa Brígida, Eliana Sousa  
Ximendes, Nivia da Silva Dias*

Revisão de texto  
*José Cesamildo Cruz Magalhães*

Normalização bibliográfica  
*Rita de Cassia Costa Cid*

Projeto gráfico da coleção  
*Carlos Eduardo Felice Barbeiro*

Editoração eletrônica  
*José Cesamildo Cruz Magalhães*

Foto da capa  
*André Luís Souza Pereira*

**1ª edição**  
On-line (2021)

**Todos os direitos reservados.**

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte,  
constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**

Embrapa Agroindústria Tropical

---

Silva Neto, Raimundo Marcelino da

Viabilidade técnica e econômica de processo simulado para produção de celulose bacteriana em melaço de soja / Raimundo Marcelino da Silva Neto, Carlos Wagner Castelar Pinheiro Maia, Morsyleide de Freitas Rosa. – Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, 2021.

24 p. : il. ; 21 cm x 29,7 cm. – (Documentos / Embrapa Agroindústria Tropical, ISSN 2179-8184; 192).

Publicação disponibilizada on-line no formato PDF.

1. Celulose bacteriana. 2. Melaço de soja. 3. Nanopartículas. I. Maia, Carlos Wagner Castelar Pinheiro. II. Rosa, Morsyleide de Freitas. III. Título. IV. Série.

CDD 635.655

## Autores

### **Raimundo Marcelino da Silva Neto**

Engenheiro de alimentos, doutor em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, analista da Embrapa Agroindústria Tropical, Fortaleza, CE

### **Carlos Wagner Castelar Pinheiro Maia**

Administrador de empresas, mestre em Logística e Pesquisa Operacional, analista da Embrapa Agroindústria Tropical, Fortaleza, CE

### **Morsyleide de Freitas Rosa**

Engenheira química, doutora em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, pesquisadora da Embrapa Agroindústria Tropical, Fortaleza, CE

## Apresentação

As Plataformas de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação do Laboratório de Tecnologia da Biomassa da Embrapa Agroindústria Tropical constituem-se de atividades em projetos que contemplam ações estratégicas direcionadas ao aproveitamento dos recursos naturais e dos resíduos agroindustriais. Essas plataformas compreendem a de biopolímeros e novos materiais; a de processos biotecnológicos; e a plataforma de modelagem, simulação e avaliação de desempenho.

Este Documento foi elaborado como forma de transmitir, em uma linguagem simples e objetiva, a importância da implementação da modelagem e da simulação de processos como uma ferramenta a ser utilizada na avaliação de projetos em diversos segmentos industriais, neste caso utilizando-se o processo de produção da celulose bacteriana.

É importante considerar que este trabalho apresenta resultados estimados, obtidos de um modelo teórico, no qual foram introduzidos dados oriundos de ensaios realizados em laboratórios e obtidos na literatura.

Lucas Antonio de Sousa Leite  
Chefe-Geral da Embrapa Agroindústria Tropical

## Sumário

Introdução.....	6
Modelagem e simulação de processos.....	7
Fundamentos da gestão financeira: modelos determinísticos para análise de investimentos.....	9
Descrição do processo.....	9
Simulação do processo: produção de celulose bacteriana (CB).....	11
Análises econômica e de sensibilidade.....	17
Análise do custo unitário.....	17
Análise de sensibilidade para escala de produção.....	19
Considerações finais.....	21
Referências.....	22

## Introdução

Acelulose é uma das principais moléculas naturais utilizadas e tem sido tradicionalmente usada para fabricação de papel, além de outras aplicações. Algumas bactérias, em especial as do gênero *Komagataeibacter*, são capazes de produzir um biopolímero com estrutura química similar à celulose vegetal, denominado celulose bacteriana (CB). Dessa forma, podem, em determinadas aplicações, ser uma fonte alternativa à celulose vegetal, a qual é mundialmente utilizada pelas indústrias de um modo geral.

A celulose bacteriana foi relatada inicialmente por Brown (1886), que observou a formação de uma manta gelatinosa na superfície do caldo de fermentação do vinagre. A estrutura identificada era quimicamente semelhante à celulose vegetal e, por análise microscópica, evidenciou-se que havia presença de bactérias distribuídas por toda a área superficial da película.

A celulose vegetal e a CB apresentam a mesma estrutura molecular, mas a segunda tem vantagens competitivas, incluindo uma estrutura em rede naturalmente nanométrica, que atraíram atenção para sua produção. Em comparação com a celulose vegetal, a CB apresenta excelentes propriedades físicas em relação à estabilidade mecânica, resistência à tração, termoestabilidade, cristalinidade, pureza e biocompatibilidade (Barud et al., 2011; Cacicedo et al., 2016), além de um processo de purificação mais simples e de menor impacto (Gallegos et al., 2016; Gea et al., 2011).

A celulose bacteriana, há muito reconhecida como uma celulose promissora, permanece confinada, praticamente, a um produto alimentício “tradicional” (nata de coco), disponível em países asiáticos, e à área biomédica. Seu potencial, contudo, é indiscutível e, tecnicamente, pode superar a celulose vegetal, dadas suas peculiaridades (Dourado et al., 2016; Blanco et al., 2020).

Na área médica, seu emprego se dá, principalmente, em enxertos vasculares, revestimentos tópicos para feridas graves (curativos de alto desempenho e pele artificial), substituição de cartilagem, revestimento de stents arteriais e regeneração óssea (Picheth et al., 2017; Vasconcelos et al., 2020; Liu et al., 2020). A literatura relata que produtos de CB usados na cicatrização de queimaduras e feridas promoveram a melhoria da regeneração da pele e alívio da dor (Khalid et al., 2017).

Devido às suas propriedades de suspensão, espessamento, retenção de água, estabilização, volume e fluidez, a CB vem sendo indicada como um ingrediente de volume promissor de baixa caloria para o desenvolvimento de novos alimentos funcionais, seja como espumas, em pó, na forma gelatinosa ou triturada, que facilitam sua aplicação na indústria de alimentos (Cao et al., 2020). Pesquisas recentes sobre a utilização de CB em alimentos sugerem o emprego de suas nanopartículas (nanocristais e nanofibras) como estabilizadores das chamadas emulsões *Pickering* de óleo em água, constituindo-se, portanto, em um potencial promissor emulsificante de grau alimentício (Zhai et al., 2018).

Há ainda relatos do emprego da CB no desenvolvimento de máscaras faciais, dispositivos optoeletrônicos, papéis condutores, membranas purificadoras de água, produtos têxteis (roupas, jaquetas, sapatos) e papéis de filtro (Islam et al., 2017).

Atualmente as pesquisas relacionadas à exploração comercial da CB estão centradas em associação aos mercados de valores agregados elevados, como no campo da biomedicina, farmacêutica, eletrônica, embalagens, aditivos para alimentos, entre outros (Kargarzadeh et al., 2017).

No campo da produção de CB, há espaço para o desenvolvimento de processos que envolvam a mudança do meio de fermentação, também referido como meio de cultura, (ex.: fontes agroindustriais), tipo de sistema (ex.: agitado, estático sob batelada alimentada), designer do reator, dentre outros, sempre visando ao aumento na produtividade e à redução do custo de produção.

Na literatura, encontram-se estudos dedicados a projetar um processo econômico para a produção de CB, otimizando as operações da primeira transformação, acabamento e acondicionamento, incluindo a avaliação

de vários meios de culturas, sistemas de fermentação, engenharia genética, etc. Embora a literatura científica propague a ideia de que a produção tecnológica da CB implique em custos elevados, uma análise adequada sobre os aspectos econômicos e financeiros de um processo tecnológico para uma produção de escala de CB é praticamente inexistente (Dourado et al., 2016).

Dessa forma, a avaliação econômica de um projeto é de extrema importância para tomada de decisão, visto que busca mensurar o retorno sobre o capital investido, ou seja, se o projeto será ou não de interesse do investidor.

Por essa razão, um projeto inovador desenvolvido, quer seja por uma instituição de pesquisa ou uma empresa, deve considerar a necessidade de um estudo de viabilidade técnica e econômica que vise avaliar as possibilidades de sucesso de um negócio ou produto, considerando os aspectos técnicos, comerciais, operacionais e econômicos.

Os ganhos econômicos e riscos correspondentes do empreendimento podem ser simulados com o emprego de técnicas ou ferramentas de simulação para avaliar alternativas e acelerar o processo de desenvolvimento de produtos de uma indústria de transformação. De uma maneira geral, elas são usadas no desenvolvimento ao longo do ciclo de vida dos produtos. A simulação dos processos inclui demandas de matéria-prima, insumos e mão de obra para obtenção de um produto final e derivado, balanços de massa e energia de processos integrados, dimensionamento de equipamentos, análise de custos, planejamento de operações em lote, avaliações de impacto ambiental, análises de taxa de transferência do processo e eliminação de alguns gargalos dos processos (Kwiatkowski et al., 2006).

Considerando-se o potencial de aplicação da celulose bacteriana, ainda é escassa em nossa literatura uma análise técnica e econômica do processo de produção da CB que apresente um elevado rendimento de produção, baixo custo operacional e que utilize matéria-prima oriunda do processamento agroindustrial nacional. Sendo assim, este Documento apresenta o estudo de viabilidade técnica e econômica do processo de produção escalonado (por simulação) de CB em melaço de soja hidrolisado (MSH), que foi utilizado como meio de cultura alternativo. O meio de cultura sintético Hestrin; Schramm (HS) foi usado como referência (Hestrin; Schramm, 1954). As análises de custos unitários, índices financeiros e de sensibilidade foram realizadas usando-se os dados gerados das modelagens e simulações realizadas, a partir de dados de escala laboratorial, com o uso do software SuperPro Designer v.10.0 (Intelligent, Inc., Scotch Plains, NJ).

## Modelagem e simulação de processos

A simulação tem por objetivo entender o comportamento de um determinado processo, sua forma operacional e possíveis estratégias de ação para eventuais problemas. Porém, trata-se apenas de uma aproximação da realidade, pois o software realiza “avaliações virtuais” com base em modelos matemáticos já programados em seu sistema para cada tipo de processo, não sendo possível retratar todos os aspectos de um caso real. Portanto, a simulação se limita a uma aproximação razoável do caso que está sendo estudado, permitindo tomar uma ação que acarrete resultados próximos aos esperados (Dimian et al., 2014).

O processo de simulação assistido por computador (PSAC) é uma das ferramentas que podem ser aplicadas para executar o balanço de massa e energia, bem como cálculos de dimensionamento e avaliação de custos, sendo utilizado como um instrumento analítico nas indústrias petroquímicas desde o final dos anos 1960 (Papavasileiou et al., 2007; Alshekhli et al., 2011).

No entanto, essa ferramenta é relativamente nova para outras indústrias de processo. Por exemplo, na produção bioquímica, o uso de PSAC só foi relatado desde meados da década de 1990 (Petrides, 1994; Athimulam et al., 2006; Alshekhli et al., 2011). Mais recentemente, o PSAC também estava sendo utilizado nos processos de tratamento de água (Petrides, 2001), na produção farmacêutica (Tan et al., 2006), bem como no processamento de leite (Bon et al., 2010).



Atualmente, softwares podem ser utilizados para modular processos nas áreas química, bioquímica, farmacêutica, fabricação de alimentos, bioprocessos, entre outras. Esses simuladores podem representar todo um processo industrial no computador; realizam balanços de materiais e energia; permitem estimar a capacidade do equipamento, calcular as demandas por mão de obra e serviços públicos ao longo do tempo; realizam análise de custos; e contribuem com dados para avaliação de impacto ambiental de um dado processo industrial. Além disso, essas ferramentas comerciais contêm extensas bases de dados com especificações sobre os materiais de construção, fornecedores e preços estimados (Peters et al., 1991).

O SuperPro Designer se apresenta como um software adequado para a concepção de um estudo de viabilidade técnica e econômica da produção de celulose bacteriana, visto que possui em sua biblioteca informações da área biotecnológica, com número considerável de operações unitárias e seus equipamentos para tal, como reatores, filtros, centrífugas, secadores, entre outros. Além do mais, permite que o usuário simultaneamente modele, simule e avalie técnica e economicamente o seu projeto, visto que é capaz de estabelecer linha de processo, fornecer o custo dos equipamentos, utilidades, acessórios utilizados, entre outros dados importantes para alcançar o objetivo do estudo (Athimulam et al., 2006).

O desenvolvimento de um projeto completo de uma planta de processamento envolve vários processos distintos e complexos relacionadas com a localização e o layout da planta, disponibilidade de matérias-primas, construção, projeto estrutural, utilidades, armazenamento, manipulação de materiais, segurança, desperdício e alienação, impostos, patentes, transporte e mercados. A evolução da tecnologia da informação na modelagem e na simulação impactou fortemente na engenharia de processos (Rouf et al., 2001).

O modelo de simulação se inicia com a coleta de todas as informações, ou seja, descrição do processo, diagrama de fluxo das entradas e saídas das correntes desde a alimentação de matéria-prima e insumos à obtenção do produto final, dimensionamento da produção em regime de batelada ou contínuo, etapas do processamento com suas respectivas durações e condições operacionais, sequenciamento e parâmetros de desempenho dos procedimentos operacionais de todas as etapas do processamento, equipamentos disponíveis para as etapas do processamento, materiais consumidos ou gerados pelo processo, além de outros requisitos de recursos, por exemplo, mão-de-obra, utilidades (agentes de aquecimento/resfriamento, tipos de energia requerida pelos equipamentos), serviços públicos, etc. (Guide, 2007).

O modelo é construído passo a passo, ou seja, cada operação unitária ou etapa do processo, representado pelo desenho do seu respectivo equipamento, é inserido na interface do software. Em seguida, verifica-se o desempenho e resultado dos procedimentos operacionais atribuídos àquela operação unitária. Por exemplo, em um tanque homogeneizador podem ser inseridos os seguintes procedimentos operacionais, entre outros: entrada de matéria-prima de uma operação anterior, resfriamento, carregamento de insumos, agitação e saída à operação subsequente. O sequenciamento de operações unitárias, com seus respectivos procedimentos operacionais atribuídos, formará o processo produtivo. Isso se dará por meio da conexão dos equipamentos, simbolizados pelos seus respectivos desenhos, aos fluxos ou correntes de material.

Para cada procedimento operacional atribuído a uma etapa do processo, representado pelo seu respectivo equipamento, o simulador inclui um modelo matemático que realiza cálculos de balanço de materiais e energia. Com base nesses resultados, ele realiza cálculos de tamanho de equipamento que será ajustado para atender os procedimentos operacionais definidos para aquela etapa do processo. O equipamento é então dimensionado de forma que seja grande o suficiente e, portanto, não seja sobrecarregado durante qualquer operação, porém não maior do que o necessário, visando minimizar os custos de capital (Petrides, 2000; Petridis et al., 2003; Guide, 2007).

## Fundamentos da gestão financeira: modelos determinísticos para análise de investimentos

A tomada de decisão sobre investimentos, principalmente quando pensada no longo prazo, deverá estar ancorada em um sistema de informações gerenciais que possibilite ao investidor antecipar oportunidades ou riscos do empreendimento almejado. Nesse sentido, segundo Rêgo et al., (2006), “a maneira mais eficaz é simular o investimento segundo algum modelo. Dessa forma, confrontam-se os fluxos de caixa gerados com o investimento realizado”. Já os fluxos de caixa são explicados como as entradas e saídas de capital derivadas de um novo investimento (Kato, 2012).

Portanto, como métodos de apoio à tomada de decisão gerencial, o presente artigo utiliza o retorno sobre o investimento (ROI), a margem bruta, o valor presente líquido (VPL), a taxa interna de retorno (TIR), o *payback* e a análise de sensibilidade. Além da relevância dos conceitos de análise de investimentos em si, a escolha desses ocorre em função dos resultados fornecidos pelo software.

O ROI é definido por Tracy (2000) como “a ferramenta básica para a avaliação dos investimentos de capital” e expressa na razão entre lucro e investimento. A margem bruta, dada pela divisão do lucro bruto pelas vendas líquidas, “representa a percentagem de cada real de venda que restou após a empresa ter deduzido os custos de venda” (Costa et al., 2011). Já o valor presente líquido (VPL) pode ser compreendido por seu objetivo de “[...] somar as entradas operacionais do fluxo de caixa de um projeto ao seu investimento inicial (CAPEX), utilizando uma taxa mínima de atratividade (TMA) para descontá-los financeiramente ao seu valor presente” (Kato, 2012). A taxa interna de retorno (TIR) permite aos investidores avaliar o custo de capital. “O método TIR apresenta o ganho financeiro de um projeto em termos percentuais por período” (Kato, 2012) e possibilita, no mínimo, o ganho do custo de capital como retorno do investimento. Conforme Rêgo et al. (2006), o *payback* considera o tempo de retorno do capital investido, que é definido pelo investidor e, na análise de sensibilidade, são identificadas as variações de um indicador crítico, por exemplo: VPL, frente à variação de determinado fator crítico (receita, unidades vendidas, custos operacionais, maturidade do projeto, taxa de desconto, etc.).

O investimento total de capital necessário para implementar um projeto inclui dois componentes principais: investimento em capital fixo e capital de giro. O primeiro componente, que pode ser dividido em gastos diretos e indiretos, corresponde brevemente ao capital necessário para construir uma planta de processamento apta para operar, o que envolve a construção de instalações físicas e compra de equipamentos. O capital de giro corresponde ao investimento adicional necessário, além do capital fixo, para iniciar e manter o processo de operação, especialmente durante os primeiros meses ou anos de atividade da planta. Esse capital é direcionado a cobrir salários, contas de serviços públicos, como eletricidade ou gás, combustíveis, matérias-primas e outros suprimentos. Devido à sua finalidade específica de garantir a liquidez da empresa por um determinado período, ele é incluído como o segundo componente do investimento total de capital.

Juntamente com o investimento de capital, uma estimativa dos custos operacionais ou custos de produção também deve ser feita (Kato, 2012). O custo de produção total pode ser entendido como a soma do custo variável e o fixo, ou seja, a soma dos custos que variam de acordo com a quantidade de matéria-prima processada e aqueles que não se alteram, respectivamente. Todos são computados de forma a fornecer valores anuais, o que reduz efeitos sazonais, a serem utilizados no fluxo de caixa necessário para a estimativa da rentabilidade do empreendimento.

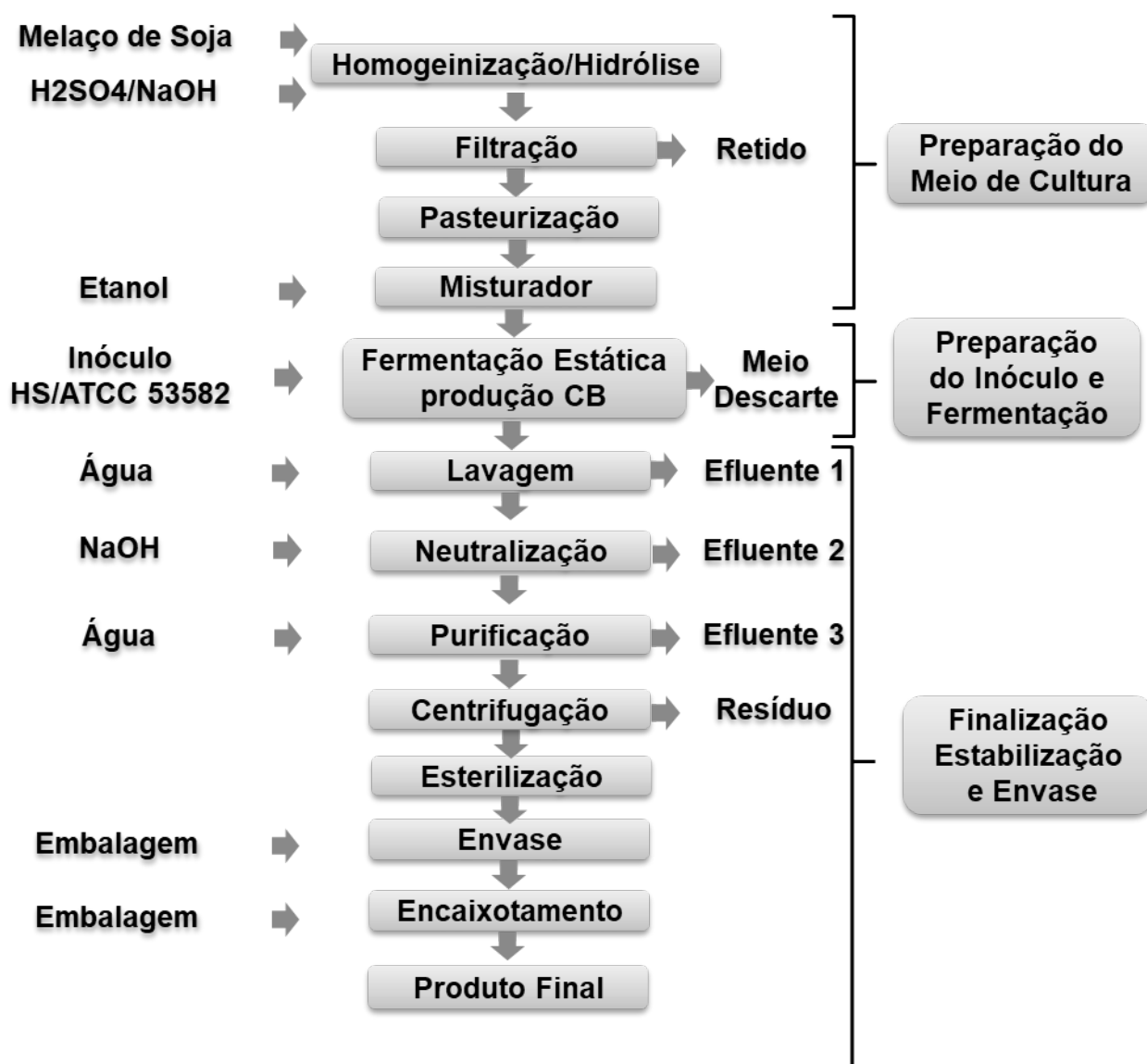
## Descrição do processo

O processo em estudo baseia-se em dados laboratoriais obtidos em escala de bancada, que consistiu na produção de celulose bacteriana por *Komagataeibacter xylinus* ATCC 53582 utilizando-se melaço de soja hidrolisado (MSH) suplementado com etanol, como meio alternativo de fermentação, em cultivo estático Chagas (2018). O resultado obtido foi comparado com a produção de CB utilizando-se o meio sintético de

referência HS (Hestrin; Schramm, 1954), tradicionalmente utilizado como meio de cultivo para produção de CB. A partir dos protocolos seguidos e dos dados obtidos em laboratório, foram projetados os processos de produção industrial, conforme demonstram as Figuras 1 e 2.

Chagas (2018) obteve uma produção de 7,0 g/l (massa seca) de celulose bacteriana a partir de uma solução aquosa de melaço de soja hidrolisado com 5% de ácido sulfúrico 1 M, tratada termicamente a 90°C/10min, suplementado com 2% de etanol, após 10 dias de processo de fermentação em cultura estática de *Komagataeibacter xylinus* ATCC 53582.

A mesma produção de 7,0 g/l foi obtida utilizando-se o meio sintético HS após 10 dias de fermentação, indicando que a mudança de meio não afetou a produção do biopolímero.



**Figura 1.** Processo fermentativo da celulose bacteriana utilizando-se meio alternativo melaço de soja hidrolisado.

Fonte: elaborada pelos autores.



**Figura 2.** Processo fermentativo da celulose bacteriana utilizando-se meio HS.

Fonte: elaborada pelos autores.

## Simulação do processo: produção de celulose bacteriana (CB)

Foi estabelecido um modelo de processo de produção da celulose bacteriana utilizando-se o software SuperPro 10.0 Designer (Intelligen, Inc., Scotch Plains, NJ) para os dois meios de cultura avaliados.

O fluxo do processo fermentativo adotado na simulação foi adaptado e otimizado de Dourado (2016), no qual, para o melaço de soja hidrolisado, foram inseridas as operações unitárias iniciais necessárias para a sua hidrólise. O processo de fermentação descrito combina as vantagens das condições de cultivo em estado estacionário e da produção contínua de CB.

Na simulação do processo, foram adotados os dados das formulações conforme Chagas (2018), que foram utilizados para o aumento de escala (Tabela 1).

Para simular o aumento da escala de produção, o programa SuperPro Designer atualiza o investimento para compra dos equipamentos (CCP) relacionando as capacidades dos equipamentos, conforme mostrado na equação (1), onde  $C_0$  é o custo do item básico,  $Q$  e  $Q_0$  são as capacidades do equipamento novo e do básico, respectivamente, e  $a$  é definido como 0,6 usando o padrão do programa (Peters et al., 2005).

$$(1) (CCP) = C_0 \left( \frac{Q}{Q_0} \right)^a$$

**Tabela 1.** Formulação para produção de um litro dos meios de cultura.

Melaço de soja hidrolisado (MSH) suplementado com 2% de etanol		HS	
Descrição	Quantidade	Descrição	Quantidade
Melaço de soja	75,00 g	Glicose	20,00 g
Ácido sulfúrico	2,66 mL	Extrato de levedura	5,00 g
Hidróxido de sódio	3,45 g	Peptona	5,00 g
Etanol	20,00 mL	Fosfato dissódico	2,70 g
-----	-----	Ácido cítrico	1,15 g
Água	857,04 mL	Água	966,15 mL

Fonte: Chagas (2018).

Os valores obtidos de volume das correntes de alimentação foram calculados por meio do comando “Adjust Process Throughput”; neste caso, foram definidas correntes de alimentação da unidade produtiva para processar em média 90 toneladas de matéria-prima por mês em regime de batelada para a produção de CB com 85% de umidade.

A Figura 3, gerada a partir do programa, apresenta o processo de produção da CB a partir do melaço de soja hidrolisado. O processo compreende 4 (quatro) sessões distintas: Preparação do Meio Cultura (MC), Propagação do Inóculo (PI), Fermentação Estática e Estabilização/Acondicionamento da CB. Na sessão de preparação do meio de cultura (MC), foram estabelecidas duas linhas de operações unitárias que operam em paralelo, quase simultaneamente, iniciando a primeira e a segunda linha com os equipamentos (P1/V-101) e (P2/V101), respectivamente.

A primeira linha do processo contida na sessão Preparação Meio de Cultura (MC) possui as operações direcionadas para a produção do MC HS que será utilizado na sessão seguinte, denominada Propagação do Inóculo (PI). A segunda linha localizada abaixo da primeira se destina à produção do MC a partir do melaço de soja hidrolisado (MSH) e suplementado com etanol, que será utilizado na sessão de fermentação estática.

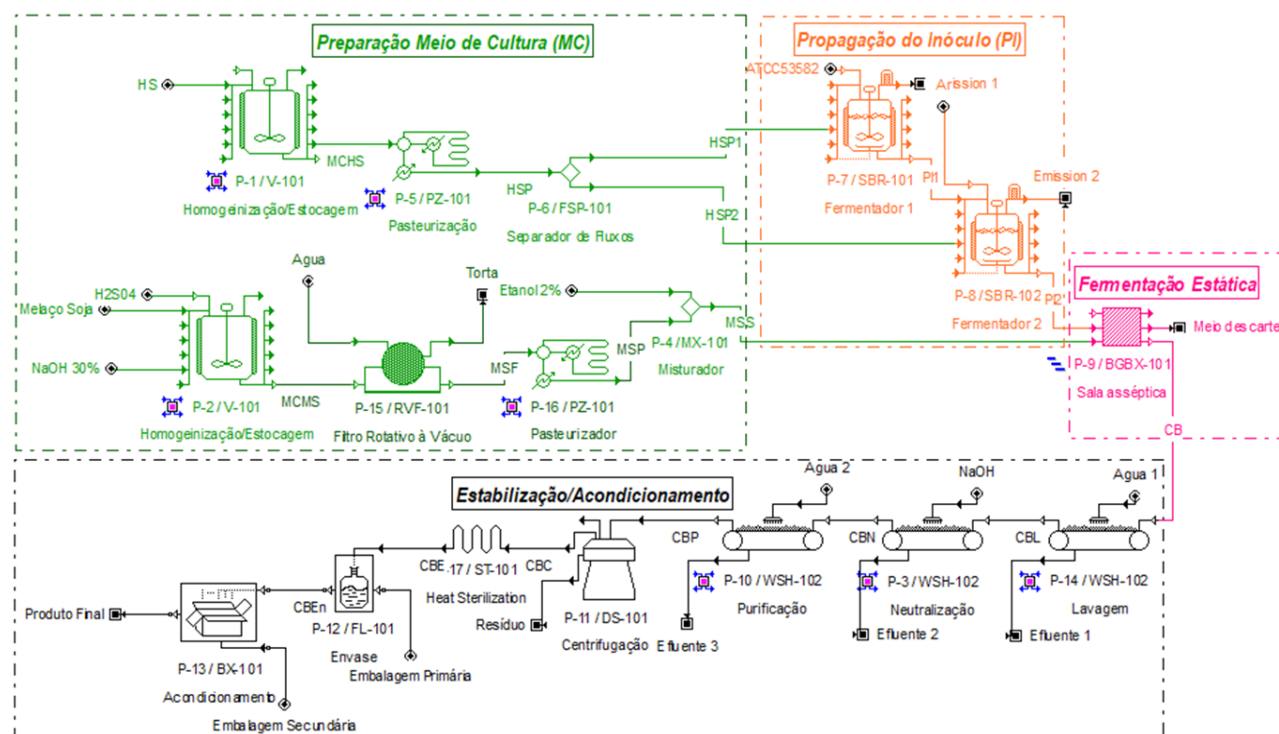
Os equipamentos (P1/V-101) e (P2/V101) citados anteriormente estão simbolizados na Figura 3 por motivo didático, pois, na realidade, haverá somente um equipamento no processo de fermentação. Este será operado em regime de compartilhamento para atender as duas linhas de produção citadas anteriormente. O software possibilita a utilização do compartilhamento de equipamentos como estratégia de otimização do processo e redução do custo de investimento. Nota-se que os equipamentos que estão compartilhados em todo o processo apresentam a mesma numeração ao lado da sua inicial, neste caso (V-101), como também o símbolo do compartilhamento, um pequeno quadrado compartilhando correntes de processos, simbolizados com fluxos de entrada e saída (setas), ao lado esquerdo do seu código.

A matéria-prima para a formulação do meio de cultura HS (MCHS) é alimentada no tanque de homogeneização (V-101), que segue para ser pasteurizado em (PZ-101) e distribuído por meio do (FSP-101), pelos dutos (HSP1) e (HSP2), aos Fermentadores 1 e 2, onde ocorre o crescimento da biomassa, identificados como (SBR-101) e (SBR-102), respectivamente. O (SBR-101) é alimentado também com o inóculo ATCC 53582, o qual se propaga durante 3 dias para a formação da biomassa.

O Fermentador 2 (SBR-102) é alimentado por meio do duto (PI1) com a biomassa constituída de inóculo formada pelo Fermentador 1, bem como com o meio de cultura HS proveniente do duto (HSP2) para uma segunda propagação, também durante um período de 3 dias.

A etapa de propagação do inóculo é alcançada por sucessivas propagações da biomassa e do meio de cultura (MC) na proporção de 1:10 (biomassa: MC). Para atender a produção planejada, foram definidas as capacidades de 100 L e 1000 L para os fermentadores de propagação do inóculo (SBR-101) e (SBR-102), respectivamente.

Vale ressaltar que, nessa simulação, a estrutura necessária para manutenção e cultura inicial das cepas não foi considerada, embora seja a mesma, independentemente dos meios avaliados.



**Figura 3.** Processo de produção da celulose bacteriana utilizando-se o meio melaço de soja hidrolisado. MCHS - Meio de cultura HS (Hestrin; Schramm); HSP - HS pasteurizado; HSP1 - HS Pasteurizado 1; HSP2 - HS Pasteurizado 2; PI1 - Propagação inóculo 1; PI2 - Propagação inóculo 2; MCMS - Melaço de soja hidrolisado; MSF - Melaço de soja filtrado; MSP - Melaço de soja pasteurizado; MSS - Melaço de soja suplementado; CB - Celulose bacteriana; CBL - Celulose bacteriana lavada; CBN - Celulose bacteriana neutralizada; CBP - Celulose bacteriana purificada; CBC - Celulose bacteriana centrifugada, CBE - Celulose bacteriana esterilizada; CBE<sub>n</sub> - Celulose bacteriana envasada.



Equipamentos compartilhados.



Sala asséptica adicional operando em modo escalonado.

Fonte: SuperPro Designer (2020), adaptado pelos autores.

Conforme esquematizado na Figura 3, o inóculo propagado no fermentador SBR-102 (PI2) e o meio de cultura de melaço de soja hidrolisado filtrado, pasteurizado e suplementado (MSS), produzido na segunda linha de produção na sessão de preparação do (MC), são transportados em um volume de aproximadamente 12.000 L à “sala limpa” para ocorrer a fermentação em condições estáticas. Essa unidade genérica, que representa uma operação unitária que o programa dispõe, simula as condições de fermentação estática da cultura, ou seja, uma sala com ambiente controlado, com nível mínimo de poluentes, contendo estantes e bandejas onde serão realizadas as fermentações e operando a 30 °C durante 10 dias por batelada.

Com base nos dados inseridos referentes às operações unitárias, rendimento de processo, matérias-primas, etc., o software estima o investimento em equipamentos utilizando correlações de custo interno de dados derivados de vários fornecedores e fontes de literatura. Dados de alguns equipamentos foram obtidos por meio de fontes diretas de literatura, pois estes não estavam disponíveis na biblioteca do software. As informações dos equipamentos apresentados na Figura 3 (tipo, tamanho, quantidade e investimento) estão apresentadas na Tabela 2.



A sessão de fermentação estática representada por (BGBX-101) é o gargalo dominante da programação de todo o processo, isto é, seu tempo de ocupação por batelada excede qualquer outro equipamento no processo, levando a grandes tempos de ciclo da planta. Assim, 02 (duas) salas limpas extras identificadas com o código (STG01, STG02) foram consideradas neste projeto para operar em regime escalonado, otimizando o processo a fim de atender a demanda da produção.

**Tabela 2.** Especificações e custos dos equipamentos da linha de produção da CB utilizando-se o meio melaço de soja hidrolisado com capacidade de processar em média 90 toneladas/mês de matéria-prima (preço de 2019).

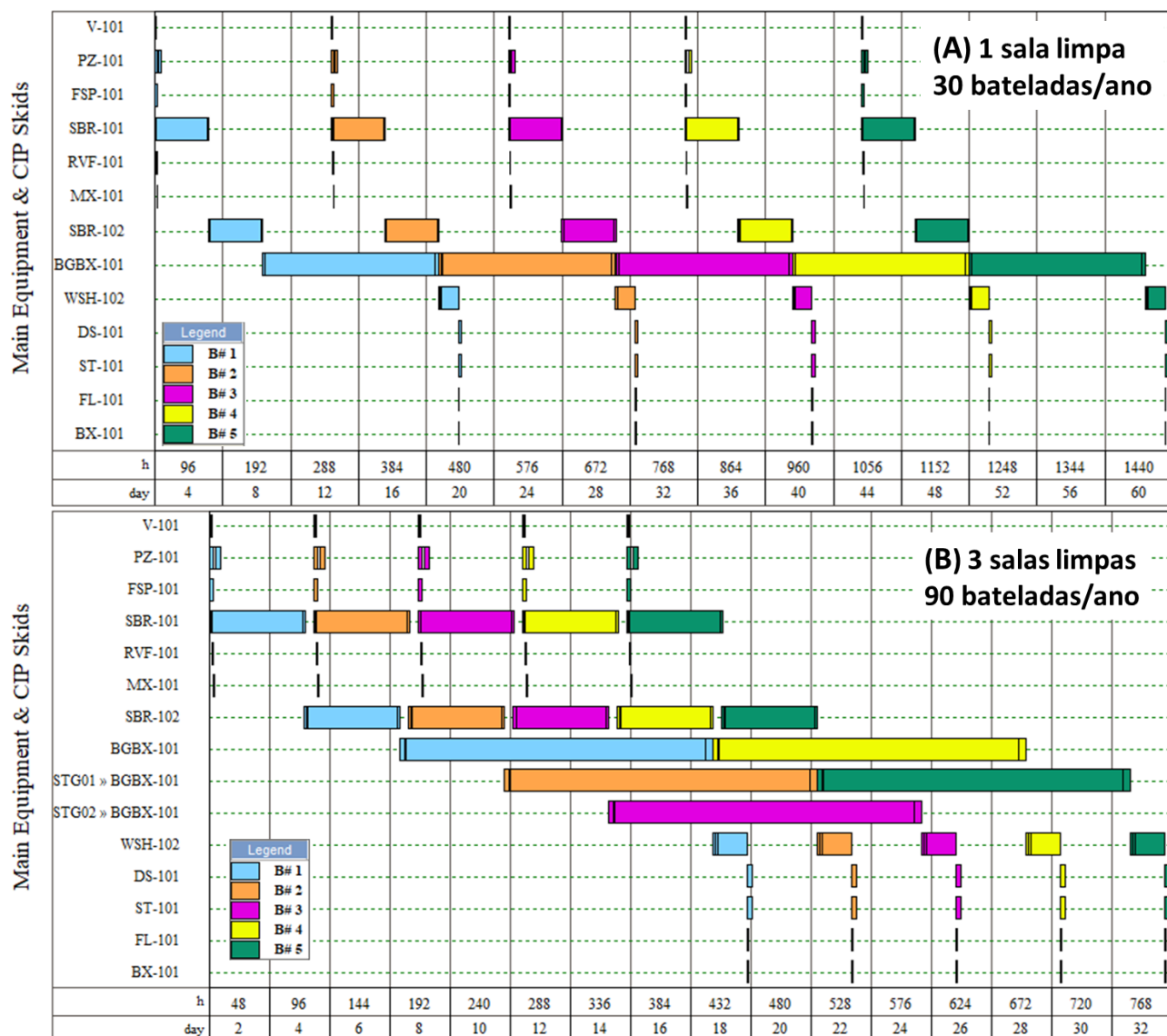
Código	Equipamento	Quantidade	Capacidade	Custo unitário <sup>(1)</sup> (R\$)
V-101	Tanque homogeneizador	1	12.503,21 L	1.053.108,00
SBR-101	Biorreator de crescimento	1	122,66 L	1.792.791,00
SBR-102	Biorreator de crescimento	1	1.237,66 L	4.839.282,00
BGBX-101	Sala asséptica	3	14.892,38 L	3.428.869,50 <sup>(2)</sup>
FSP-101	Divisor de fluxos	1	880,00 kg/h	4.179,00 <sup>(2)</sup>
MX-101	Misturador de fluxos	1	1.113,26 kg/h	8.358,00 <sup>(2)</sup>
WSH-101	Lavador de esteira	1	7.901,08 kg/h	91.938,00 <sup>(2)</sup>
PZ-101	Pasteurizador	1	2.949,73 l/h	106.103,40
ST-101	Esterilizador	1	1.793,38 l/h	279.000,00
FL-101	Envasador	1	706,9 unid./h	112.833,00 <sup>(2)</sup>
BX-101	Embalador	1	70,69 unid./h	91.938,00 <sup>(2)</sup>
RVF-101	Filtro rotativo a vácuo	1	42,06 m <sup>2</sup>	610.000,00
DS-101	Centrífuga de disco	1	2.166,50 l/h	2.045.000,40
Outros				2.892.679,98
<b>Total</b>				<b>17.356.079,88</b>

<sup>(1)</sup> Cotação de 22/01/2020 (1 US\$ = R\$ 4,1750).

Fonte (s): SuperPro Designer (2020); <sup>(2)</sup> Dourado (2016).

Ao incluir as salas adicionais operando no modo escalonado, consequentemente se reduz o tempo de ciclo de produção, possibilitando aumentar de 30 para 90 bateladas/ano (Figuras 4A e 4B).

Após a fermentação, a celulose bacteriana (CB) formada deve ser purificada. Para tanto, é lavada, neutralizada com solução de hidróxido de sódio e novamente lavada, utilizando-se o lavador por aspersão (WSH-101), o qual se encontra compartilhado para atender às três operações sequenciadas citadas. Em seguida, a CB é centrifugada (DS-101), envasada em embalagem primária de sacos de polietileno com capacidade de 10 kg, seguindo para a embalagem secundária, em caixas de papelão com capacidade para 100 kg, nos equipamentos FL-101 e BX-101, respectivamente, finalizando a sessão de estabilização e acondicionamento.



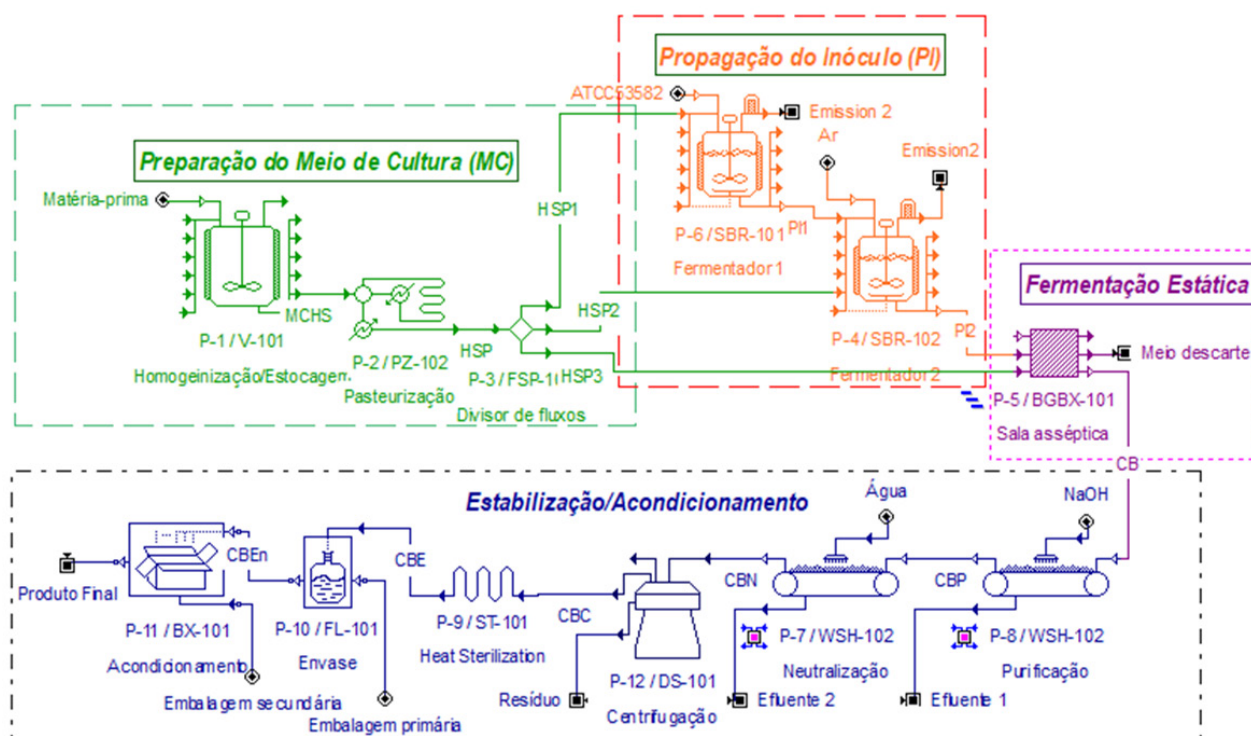
**Figura 4.** Diagrama de utilização dos equipamentos do processo de produção da celulose bacteriana, utilizando-se o meio melaço de soja hidrolisado, em regime de batelada.

Fonte: SuperPro Designer (2020).

A Figura 5, também gerada a partir do programa, apresenta o processo de produção da (CB) utilizando-se o meio de cultura HS. A diferença existente entre os processos de produção apresentados nas Figuras 3 e 5 é que neste último somente o meio HS é utilizado nas sessões de Preparação de Meio Cultura (MC), Propagação do Inóculo (PI) e Fermentação Estática, seguindo a mesma sequência lógica de operações unitárias estabelecida no processo de produção de (CB) apresentado na Figura 3.

As informações dos equipamentos apresentados na Figura 5 (tipo, tamanho, quantidade e custo) estão apresentadas na Tabela 3.





**Figura 5.** Processo de produção da celulose bacteriana utilizando-se o meio HS. MCHS - Meio de cultura HS (Hestrin; Schramm); MCP - Meio de cultura pasteurizado; HSP1 - HS Pasteurizado 1; HSP2 - HS Pasteurizado 2; HS3 - HS Pasteurizado 3; PI1 - Propagação do inóculo1; PI2 - Propagação do inóculo 2; CB - Celulose bacteriana; CBP - Celulose bacteriana purificada; CBN - Celulose bacteriana neutralizada; CBC - Celulose bacteriana centrifugada, CCE - Celulose bacteriana esterilizada; CBE - Celulose bacteriana envasada.

Equipamentos compartilhados. Sala asséptica adicional operando em modo escalonado.

Fonte: SuperPro Designer (2020), adaptado pelos autores.

**Tabela 3.** Especificações e custos dos equipamentos da linha de produção da CB utilizando-se o meio HS, com capacidade de processar em média 90 toneladas/mês de matéria-prima (preço 2019).

Código	Equipamento	Quantidade	Capacidade	Custo unitário <sup>(1)</sup> (R\$)
V-101	Tanque homogeneizador	1	13.372,19 L	1.069.824,00
SBR-101	Biorreator de crescimento	1	145,38 L	2.076.963,00
SBR-102	Biorreator de crescimento	1	1.453,46 L	4.872.714,00
BGBX-101	Sala asséptica	2	14.900,00 L	3.428.869,50 <sup>(2)</sup>
WSH-101	Lavador	1	6.584,67 kg/h	91.938,00 <sup>(2)</sup>
PZ-101	Pasteurizador	1	9.627,98 l/h	183.876,00
DS-101	Centrífuga de disco	1	1.655,98 l/h	1.818.000,89
ST-101	Esterilizador	1	1.339,43 l/h	1.101.702,00
FL-101	Envasador	1	27,56 unid./h	112.833,00 <sup>(2)</sup>
BX-101	Embalador	1	2,76 unid./h	91.604,00
FSP-101	Divisor de fluxos	1	9.576,99 kg/h	4.179,00 <sup>(2)</sup>
Outros				2.970.500,67
<b>Total</b>				<b>17.823.004,06</b>

<sup>(1)</sup> Cotação de 22/01/2020 (1 US\$ = R\$ 4,1750).

Fonte (s): SuperPro Designer (2020); <sup>(2)</sup> Dourado (2016).

## Análises econômica e de sensibilidade

### Análise do custo unitário

Após a simulação do processo produtivo, com a definição de suas correntes de alimentação, equipamentos e utilidades, verificação e fechamento do balanço de massa e energia, calcula-se o custo unitário da produção de CB.

O investimento total para a planta de processo de produção de celulose bacteriana utilizando-se os meios HS e o melaço de soja hidrolisado (MSH), apresentados na Tabela 4, contemplou o investimento de capital fixo, as necessidades de capital de giro e os gastos de inicialização. Como investimentos no ativo imobilizado, foram elencados: aquisição e instalações dos equipamentos, tubulações, instrumentações, isolamentos, instalações elétricas, investimentos em edificações e as melhorias nas áreas internas e externas. O software utiliza um método fatorial para estimar esses valores aportados. Os gastos indiretos incluem os custos de engenharia acrescentados aos custos de construção, ambos estimados em 25% e 35% do CD, respectivamente. As demais destinações de capital consistem em taxas dos contratados e contingências.

**Tabela 4.** Total estimado do investimento direto para implantação de uma planta de processo de produção de CB utilizando-se os meios HS e melaço de soja hidrolisado (MSH) com capacidade de processar em média 90 toneladas/mês de matéria-prima.

Item	HS (R\$) <sup>(1)</sup>	MSH (R\$) <sup>(1)</sup>
A. Investimento no ativo imobilizado (IAI)	75.295.240	78.920.114
1. Gastos com equipamentos (GE)	22.731.460	23.818.311
2. Instalações	9.827.937	10.315.051
3. Tubulações	7.954.704	8.337.059
4. Instrumentação e controles	9.091.713	9.529.927
5. Revestimento	683.948	715.720
6. Elétrica	2.274.017	2.381.397
7. Instalações físicas, processos e auxiliares	10.228.722	10.718.457
8. Melhorias no pátio	3.411.026	3.574.265
9. Instalações auxiliares	9.091.713	9.529.927
B. Gastos Indiretos Totais (GIT)	45.175.401	47.345.995
1. Engenharia e supervisão	18.823.810	19.727.860
2. Despesas de construção	26.351.591	27.618.136
C. Investimento Total da Planta (ITP = IAI + GIT)	120.470.641	126.266.109
D. Impostos e Contingências do Contratado (ICC)	18.070.161	18.938.398
1. Impostos	6.024.838	6.311.353
2. Contingências	12.045.322	12.627.045
E. Investimento de Capital Fixo (ICF = ITP + ICC)	138.540.802	145.204.508
F. Capital de Giro (CG)	3.171.426	1.831.928
G. Gastos de Inicialização (Startup) (GI)	6.296.604	7.292.538
H. Investimento Total (IT = ICF + CG + GI)	148.630.120	154.972.973

<sup>(1)</sup> Cotação de 22/01/2020 (1 US\$ = R\$ 4,1750).

Fonte: SuperPro Designer (2020), adaptado pelos autores.

O custo operacional total (COT) é a soma de matérias-primas, serviços públicos, mão de obra, instalações e laboratório de controle e análise de qualidade, conforme apresentado na Tabela 5.

Os gastos com instalações representam a perda de valor do Investimento de Capital Fixo (ICF) realizado, que compreendem a depreciação e os dispêndios de manutenção de equipamentos, seguros, impostos locais e outras despesas gerais de fábrica, referem-se à planta física em si, portanto não afetada pelos níveis de produtividade. A depreciação é um custo operacional dependente do tempo, representa uma perda de capital fixo, principalmente devido aos desgastes dos equipamentos e instalações e a obsolescência.

Os custos de laboratório considerados para a realização de análises de desenvolvimento e controle de qualidade do produto e processo foram estimados no programa em 15% dos custos totais de mão de obra.

O custo unitário da CB foi calculado como o quociente dos custos operacionais anuais divididos pela quantidade anual de CB produzida, ou seja, a quantidade produzida por batelada multiplicada pelo o número de bateladas feitas por ano. A previsão da produção de CB nos dois meios no processo otimizado foi aproximadamente 68 caixas (100 kg/cx) por batelada, com uma produção média anual de 90 bateladas. Portanto, o custo unitário de produção previsto é de aproximadamente 96 e 75 reais por kg de CB para os meios HS e MSH, respectivamente.

Esse custo unitário foi dividido na contribuição relativa de cada fonte de custo, conforme descrito na Tabela 5. Os dois processos simulados possuem etapas semelhantes, porém o meio melaço de soja hidrolisado possui um número maior de operações unitárias do que o meio HS. Considerando-se esse processo menos complexo do que o processo que utiliza o meio melaço de soja hidrolisado e tendo em vista que ambos apresentam a mesma produção de CB (7,0 g/L), o meio HS apresenta uma previsão menos econômica. Esse fato pode estar relacionado com o percentual que os custos da matéria-prima representam no custo operacional total, conforme apresentado na Tabela 5.

**Tabela 5.** Custo operacional anual da planta de processo de produção de celulose bacteriana utilizando-se os meios HS e melaço de soja hidrolisado (MSH).

Item	HS (R\$) <sup>(1)</sup>	%	MSH (R\$) <sup>(1)</sup>	%
Custo Operacional Total (COT)	58.881.081	100,00	45.753.954	100,00
1. Matéria-prima	14.348.185	24,31	1.738.787	3,80
2. Mão de obra direta	18.570.141	31,60	17.132.910	37,44
3. Instalações	25.493.105	43,30	26.323.062	57,53
4. Insumos	22.750	0,04	32.611	0,08
5. Descarte/Tratamento de efluentes	446.900	0,75	526.584	1,15

<sup>(1)</sup> Cotação de 22/01/2020 (1 US\$ = R\$ 4,1750).

Fonte: SuperPro Designer (2020), adaptado pelos autores.

Com base nas despesas de capital acima, foi realizada análise de rentabilidade considerando-se um preço de mercado da CB em aproximadamente R\$ 104/kg como venda final, valor este utilizado por Dourado (2016) e atualizado para janeiro/2020, enquanto os custos da matéria-prima e dos insumos utilizados foram encontrados por meio de pesquisa em sites dos fornecedores.

Para o cálculo dos indicadores financeiros, é necessário o cálculo do fluxo de caixa, ou seja, todas as entradas e saídas de recursos financeiros. Para isso, sabendo-se que as saídas são os custos de operação, assim como pessoal, é necessário calcular quais os rendimentos (entrada de recursos) desse projeto. O rendimento

de um projeto consiste na soma de todas as receitas obtidas da venda de produtos, portanto informam-se ao simulador em quais correntes entraram no cálculo de receita, bem como de crédito.

Outro parâmetro importante a ser informado ao software é taxa mínima de atratividade do projeto para que seja calculado o Valor Presente Líquido (VPL). Existem três opções de valores padronizados pelo simulador: baixo (corresponde a 7% a.a.), médio (correspondente a 9,0% a.a.) e alto (correspondente a 11,0% a.a.), sendo que, para o cálculo do VPL nesta simulação, foi utilizado o primeiro valor citado. Cabe explicar que a proximidade à taxa referencial do Sistema Especial de Liquidação e de Custódia (Selic), correspondente ao período de realização do estudo presente, foi o parâmetro utilizado para a seleção do índice de 7% ao ano. Como a Selic significa o patamar de juros básico da economia, a taxa utilizada deverá ser igual ou superior a essa. A Tabela 6 apresenta os principais indicadores financeiros previstos, gerados pelo software, por meio da simulação do escalonamento do processo de produção da celulose bacteriana, utilizando-se dois meios de culturas distintos, para processar em média 68 caixas de CB (100 kg/cx) por batelada, em regime de 90 bateladas/ano, considerando-se CB com 80% de umidade.

**Tabela 6.** Indicadores financeiros previstos do investimento de implantação de uma planta de processo de produção da celulose bacteriana utilizando-se os meios HS e melaço de soja hidrolisado (MSH).

Índices	HS	MSH
Produção em massa seca (g/L)	7,0	7,0
Quantidade média cx CB/batelada <sup>(1)</sup> (cxs)	70	70
Capital de investimento total (R\$)	148.630.120	154.972.973
Custo operacional (R\$/ano)	58.881.081	45.753.954
Receita (R\$/ano)	64.000.000	64.000.000
Taxa anual da base de custos (cxs/ano)	6.100	6.100
Custo unitário de produção (R\$/cxCB)	9.600	7.500
Receita unitária de produção <sup>(2)</sup> (R\$/cxCB)	10.400	10.400
Margem bruta (%)	8,20	27,96
Retorno sobre o investimento (%)	11,03	16,11
Payback (anos)	9,07	6,21
Taxa interna de retorno (%)	2,27	8,98
Valor presente líquido (7,0% a.a) (R\$)	-39.235.848	18.790.882

<sup>(1)</sup> cxCB – Caixa com 100 kg de celulose bacteriana com 80% de umidade.

<sup>(2)</sup> Conforme Dourado et al. (2016).

Fonte: SuperPro Designer (2020), adaptado pelos autores.

Como oportunidade de investimento, pode-se afirmar que o meio HS mostra uma previsão menos atrativa, quando se considera o resultado negativo do VPL e a taxa interna de retorno (TIR) inferior à taxa mínima de atratividade (TMA) de 7% ao ano. Por outro lado, o meio MSH, segundo a simulação, apresenta resultado satisfatório em todos os indicadores.

### Análise de sensibilidade para escala de produção

Para fins de análise de sensibilidade, observaram-se as variações nos valores presentes líquidos (VPL), obtidas nos meios HS e MSH, em função de mudanças na escala de produção, que variaram de - 80% para

+ 80%. A amplitude de faixa acima referida permitiu a observação do indicador crítico (VPL), tanto no nível de produção projetado quanto em condições extremas, quais sejam: aproximação da duplicação da capacidade produtiva, no limite superior; ou zerar a quantidade produzida, no limite inferior.

A Tabela 7 mostra que a variação na escala de produção teve um impacto significativo nos custos unitários para a produção da CB, variando de R\$ 7.062 a R\$ 32.026 para meio HS e de R\$ 4.864 a R\$ 29.292 para meio MSH, valores obtidos por caixa com 100 kg de CB. Consistentes com os resultados encontrados na Tabela 5, relacionados com os custos unitários de produção da CB nos meios, ou seja, o custo unitário de produção previsto de aproximadamente 96 e 75 reais por kg de CB para o HS e MSH, respectivamente, o meio MSH apresentou uma previsão de custos unitários de produção mais baixo do que o HS, independentemente das variações das escalas de produção, indicando o ganho de eficiência que o meio de melaço de soja hidrolisado representa frente ao HS, sendo mais econômico em todas as escalas.

**Tabela 7.** Análise de sensibilidade para a influência da escala de produção no custo unitário de produção da CB produzida pelos meios HS e MSH.

Escalonamento		HS	MSH
Variação na produção (%)	Produção média (cxs <sup>(1)</sup> /ano)	Custo unitário (R\$)	Custo unitário (R\$)
80	11.200	7.062	4.864
60	10.000	7.517	5.273
40	8.600	7.964	5.795
20	7.600	8.551	6.492
0	6.100	9.590	7.519
-20	5.100	11.101	9.001
-40	3.800	13.569	11.419
-60	2.600	18.427	16.090
-80	1.300	32.026	29.292

<sup>(1)</sup> cxCB – Caixa com 100 kg de celulose bacteriana com 80% de umidade.

Fonte: elaborado pelos autores.

Portanto, em todas as escalas de produção avaliadas, o meio MSH apresentou resultados econômicos mais atrativos.

A sensibilidade dos indicadores de valor presente líquido (VPL) frente às variações consideradas para os níveis de produção está pontuada na tabela seguinte (Tabela 8). Nesta, somente o meio MSH apresentou VPL positivo para o volume de produção considerado, indicando o potencial desse empreendimento para recuperar o capital investido. Já o meio HS, neste mesmo ponto, foi negativo, indicando a inviabilidade econômica. Somente com uma variação superior a 20% no nível de produção o VPL gerado pela meio HS passa a ser positiva.

Seguem-se as análises de sensibilidade do indicador valor presente líquido (VPL) referentes às variações positivas e negativas para a produtividade projetada. No nível de produção esperado (nível 0), conforme mencionado anteriormente, somente o meio MSH é viável (VPL MSH > 0), ou seja, o empreendimento retorna o capital investido, inclusive com 12% de acréscimo. Para o mesmo estágio produtivo, o VPL HS é negativo, o que implica descarte do projeto do referido meio. Quanto à análise de sensibilidade propriamente dita, as variações negativas na escala produtiva, verificadas a partir de um decréscimo de 20%, inviabilizam os dois

projetos. Ainda assim, destaca-se o maior prejuízo causado pelo meio HS, conforme constatado em cada faixa. Essa maior intensidade de valores denota o maior risco do meio HS às variações negativas estimadas para a produção projetada. Por fim, para os acréscimos de produtividade acima do patamar de 40%, os dois projetos são viáveis, mas o meio MSH apresenta resultados mais expressivos.

**Tabela 8.** Avaliação da sensibilidade do VPL à variável crítica produtividade.

Variação na produção (%)	HS VPL (R\$)	MSH VPL (R\$)
-80	-233.132.196	-213.174.477
-60	-201.573.684	-141.228.184
-40	-134.493.934	-82.384.703
-20	-82.809.413	-28.738.061
0	-39.235.848	18.790.882
20	-1.208.270	58.525.396
40	28.412.286	100.926.638
60	49.129.179	125.627.324
80	84.186.942	185.224.443

Fonte: elaborado pelos autores.

## Considerações finais

O presente Documento apresentou um estudo de viabilidade técnica e econômica do processo de produção industrial de celulose bacteriana em meio alternativo à base de melaço de soja hidrolisado (MSH). Para tanto, foram utilizados dados laboratoriais gerados em escala de bancada e o software SuperPro Designer v. 10.0 para simular os processos escalonados. O processo de produção de CB em meio sintético de referência (HS) foi utilizado como comparação.

O projeto de um processo de transformação consiste em duas atividades principais: a síntese e a análise de processos. A atividade da síntese compreende a seleção e o arranjo de um conjunto de operações unitárias, que possibilita transformar uma matéria-prima em um produto final desejado a um custo e uma qualidade aceitável. A atividade de análise de processos gera dados que possibilitam a avaliação e comparação de diferentes soluções de síntese de processos. Geralmente a etapa de síntese é seguida por uma etapa de análise, sendo que os resultados obtidos determinam as subseqüentes etapas de síntese. Conforme verificado no presente trabalho, os simuladores de processo facilitam a análise de processos integrados, realizando balanços de massa e energia, o dimensionamento de equipamentos, a avaliação econômica, a análise do tempo de ciclo de operações e processos, a avaliação de impacto, análises de sensibilidade e de incerteza, entre outras tarefas. Assim, nos permite, por meio de simulação, obter uma previsão dos impactos futuros de um processo produtivo em uma escala industrial e, portanto, refinar a comparabilidade com produtos comercialmente disponíveis.

A busca por indicadores para análise do retorno do capital investido objetiva, primordialmente, facilitar a tomada de decisão de empreendedores e investidores. Além do resultado pertinente a cada investimento, sinalizando sua viabilidade e seu risco, esses indicadores mostram-se decisivos quando considerados projetos mutuamente excludentes.



Por conseguinte, a análise da viabilidade econômica da produção da CB em dois meios distintos, (HS) e (MSH), possibilitou as seguintes conclusões:

- Com relação aos custos unitários, o processo que utiliza o melaço de soja hidrolisado (MSH) apresentou menores valores em todas as escalas de produção testadas. Portanto, a sua produção mostrou uma previsão menos onerosa do que o processo de referência que utiliza o meio (HS).
- Com base nos indicadores econômico-financeiros, notadamente os relacionados à avaliação da rentabilidade e do retorno do capital investido, foi sinalizada uma vantagem econômica do meio MSH em relação ao HS. Corroboram essa asserção os indicadores gerados da simulação do processo em escala industrial: lucro bruto, retorno sobre o investimento, valor presente líquido, taxa interna de retorno e *payback*.
- Como oportunidade de investimento, o processo de produção da CB que utiliza o meio MSH apresentou resultado satisfatório em todos os indicadores financeiros gerados na simulação, bem como um menor risco de investimento, pois apresentou menor vulnerabilidade às oscilações nas escalas de produção.
- O escalonamento simulado nos processos de produção da celulose bacteriana (HS e MSH), obtido por simulação de processos, evidenciou a viabilidade do meio MSH e a necessidade de um ganho de produtividade superior a 20% em relação ao patamar avaliado, para tornar o meio HS viável, considerando-se o valor presente líquido.

Nesse sentido, a produção do biopolímero celulose bacteriana em melaço de soja apresentou vantagens econômicas (retorno e risco), verificadas em relação ao meio tradicional, sendo expressa no conjunto de medidas, a saber: valor presente líquido, taxa interna de retorno, *payback*, dentre outros trabalhados.

Como o trabalho baseou-se em um modelo teórico, fundado em informações laboratoriais e de literatura, ressalta-se que a obtenção de dados em ambiente operacional são importantes para validar os indicadores estimados e gerados pelo SuperPro Designer neste trabalho, ou mesmo para realizar novos estudos de viabilidade.

## Referências

- ALSHEKHILI, O.; FOO, D. C. Y.; HIL, C. L.; LAW, C. L. Process simulation and debottlenecking for an industrial cocoa manufacturing process. **Food and Bioprocess Processing**, v. 89, p. 528-536, 2011. DOI: 10.1016/j.fbp.2010.09.013.
- ATHIMULAM, A.; KUMARESAN, S.; FOO, D. C. Y.; SARMIDI, M. R.; AZIZ, R. A. Modelling and optimization of *Eurycoma longifolia* water extract production. **Food and Bioprocess Processing**, v. 84, p. 139-149, 2006.
- BARUD, H. S.; REGIANI, T.; MARQUES, R. F. C.; LUSTRI, W. R.; MESSADDEQ, Y.; RIBEIRO, S. J. L. Antimicrobial Bacterial Cellulose-Silver Nanoparticles Composite membranes. **Journal of Nanomaterials**, v. 2011, 2011. DOI: 10.1155/2011/721631.
- BLANCO, F. G.; SANTOSO, S. P.; CHOU, C. C.; VERMA, V.; WANG, H. T.; ISMADJI, S.; CHENG, K. C. Current progress on the production, modification, and applications of bacterial cellulose. **Critical Reviews in Biotechnology**, v. 40, p. 397-414, 2020.
- BON, J.; CLEMENTE, G.; VAQUIRO, H.; MULET, A. Simulation and optimization of milk pasteurization processes using a general process simulator (ProSimPlus). **Computers & Chemical Engineering**, v. 34, p. 414-420, 2010.
- BROWN, A. J. XLIII. On an acetic ferment which forms cellulose. **Journal of the Chemical Society Transactions**, v. 49, p. 432-439, 1886.

- CACICEDO, M. L.; CASTRO, M. C.; SERVETAS, I.; BOSNEA, L.; BOURA, K.; TSAFRAKIDOU, P.; DIMA, A.; TERPOU, A.; KOUTINAS, A.; CASTRO, G. R. Progress in bacterial cellulose matrices for biotechnological applications. **Bioresource Technology**, v. 213, p. 172-180, 2016.
- CAO, L.; LIU, C.; ZOU, D.; ZHANG, S.; CHEN, Y. Using cellulose nanocrystals as sustainable additive to enhance mechanical and shape memory properties of PLA/ENR thermoplastic vulcanizates. **Carbohydrate Polymers**, v. 230, p. 115-618, 2020.
- CHAGAS, B. S. das. **Produção de celulose bacteriana em meio à base de melaço de soja em cultivo estático**. 2018. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/189050/1/Dissertacao-Bruna-.pdf>>. Acesso em: 19 jan. 2020.
- COSTA, L.; LIMEIRA, A. F. F.; GONÇALVES, H. de M.; CARVALHO, U. T. de. **Análise econômico-financeira de empresas**. Rio de Janeiro: Editora FGV, 2011.
- DIMIAN, A.; BILDEA, C.; KISS, A. **Integrated Design and Simulation of Chemical Processes**. [s.l.: s.n.], 2014.
- DOURADO, F.; FONTÃO, A.; LEAL, M.; CRISTINA RODRIGUES, A.; GAMA, M. Process Modeling and Techno-Economic Evaluation of an Industrial Bacterial NanoCellulose Fermentation Process. **Bacterial Nanocellulose: From Biotechnology to Bio-Economy**, p. 199-214, 2016. DOI: 10.1016/B978-0-444-63458-0.00012-3.
- GALLEGOS, A. M. A.; CARRERA, S. H.; PARRA, R.; KESHAVARZ, T.; IQBAL, H. M. N. Bacterial cellulose: a sustainable source to develop value-added products—A review. **BioResources**, v. 11, p. 5641-5655, 2016.
- GEA, S.; REYNOLDS, C. T.; ROOHPUR, N.; WIRJOSENTONO, B.; SOYKEABKAEW, N.; BILOTTI, E.; PEIJS, T. Investigation into the structural, morphological, mechanical and thermal behaviour of bacterial cellulose after a two-step purification process. **Bioresource Technology**, v. 102, p. 9105-9110, 2011.
- GUIDE, S. D. U. **Intelligen**. Inc. New Jersey, 2007.
- HESTRIN, S.; SCHRAMM, M. Synthesis of cellulose by *Acetobacter xylinum*. 2. Preparation of freeze-dried cells capable of polymerizing glucose to cellulose. **Biochemical Journal**, v. 58, p. 345, 1954.
- ISLAM, M. U.; ULLAH, M. W.; KHAN, S.; SHAH, N.; PARK, J. K. Strategies for cost-effective and enhanced production of bacterial cellulose. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 102, p. 1166-1173, 2017.
- KHALID, A.; KHAN, R.; UL-ISLAM, M.; KHAN, T.; WAHID, F. Bacterial cellulose-zinc oxide nanocomposites as a novel dressing system for burn wounds. **Carbohydrate Polymers**, v. 164, p.214-221, 2017.
- KARGARZADEH, H.; AHMAD, I.; THOMAS, S.; DUFRESNE, A. **Handbook of nanocellulose and cellulose nanocomposites**. [s.l.]: Wiley Online Library, 2017.
- KATO, J. **Curso de finanças empresariais: fundamentos de gestão financeira em empresas**. São Paulo: M. Books, 2012.
- KWIATKOWSKI, J. R.; MCALOON, A. J.; TAYLOR, F.; JOHNSTON, D. B. Modeling the process and costs of fuel ethanol production by the corn dry-grind process. **Industrial Crops and Products**, v. 23, p. 288-296, 2006.
- PAPAVASILEIOU, V.; KOULOURIS, A.; SILETTI, C.; PETRIDES, D. Optimize manufacturing of pharmaceutical products with process simulation and production scheduling tools. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 85, p. 1086-1097, 2007. DOI: 10.1205/cherd06240.
- PETERS, M. S.; TIMMERHAUS, K. D.; RONLAD, E. West, 2003. **Plant Design and Economics for Chemical Engineers**, 2005.



PETERS, M. S.; TIMMERHAUS, K. D.; WEST, R. E. **Plant Design and Economics for Chemical Engineers**. Pennsylvania: McGraw-Hill Education, 1991. p. 923.

PETRIDES, D. Bioprocess design and economics. In: HARRISON, R. G.; TODD, P. W.; RUDGE, S. R.; PETRIDES, D. (Ed.). **Bioseparations Science and Engineering**, p. 1-60, 2000. Cap. 11. Disponível em: <<https://www.cheric.org/files/education/cyberlecture/d200301/d200301-1801.pdf>>. Acesso em: 19 jan. 2020.

PETRIDES, D. Process modelling evaluates feasibility of water recycling. **Filtration & Separation**, v. 38, p. 26-31, 2001.

PETRIDES, D. P. BioPro Designer: an advanced computing environment for modeling and design of integrated biochemical processes. **Computers & Chemical Engineering**, v. 18, p. S621-S625, 1994.

PETRIDS, D.; KOULOURIS, A.; SILETTI, C. Throughput analysis and debottlenecking of biomanufacturing facilities: what role can process simulators play? **Chimica Oggi**, v. 20, 2003.

PICHETH, G. F.; PIRICH, C. L.; SIERAKOWSKI, M. R.; WOEHL, M. A.; SAKAKIBARA, C. N.; SOUZA, C. F. de; MARTIN, A. A.; SILVA, R. da; FREITAS, R. A. de. Bacterial cellulose in biomedical applications: a review. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 104, p. 97-106, 2017.

RÊGO, R. B.; PAULO, G. P.; SPRITZER, I.; ZOTES, L. P. **Viabilidade econômico-financeira de projetos**. Rio de Janeiro: Editora FGV, 2006.

ROUF, S. A.; DOUGLAS, P. L.; MOO-YOUNG, M.; SCHARER, J. M. Computer simulation for large scale bioprocess design. **Biochemical Engineering Journal**, v. 8, p. 229-234, 2001.

SUPERPRO Designer®. New Jersey: **Intelligen Inc.**, 2020. Disponível em: <<http://intelligen.com/>>. Acesso em: 23 mar. 2020.

TAN, Y.; ZHOU, R.; ZHANG, H.; LU, G.; LI, Z. Modeling and simulation of the lag effect in a deep reactive ion etching process. **Journal of Micromechanics and Microengineering**, v. 16, p. 2570, 2006.

TRACY, J. A. **MBA compacto**: finanças - descomplicando conceitos, soluções dinâmicas, ideias inovadoras e dicas que realmente funcionam. [s.l.] Campus, 2000.

VASCONCELOS, N. F.; ANDRADE, F. K.; VIEIRA, L. de A. P.; VIEIRA, R. S.; VAZ, J. M.; CHEVALLIER, P.; MANTOVANI, D.; BORGES, M. de F.; ROSA, M. de F. Oxidized bacterial cellulose membrane as support for enzyme immobilization: properties and morphological features. **Cellulose**, v. 27, n. 6, p. 3055-3083, 2020.

ZHAI, X.; LIN, D.; LIU, D.; YANG, X. Emulsions stabilized by nanofibers from bacterial cellulose: New potential food-grade Pickering emulsions. **Food Research International**, v. 103, p. 12-20, 2018.



---

*Agroindústria Tropical*



MINISTÉRIO DA  
AGRICULTURA, PECUÁRIA  
E ABASTECIMENTO



PÁTRIA AMADA  
**BRASIL**  
GOVERNO FEDERAL